

STEJNOSMĚRNÉ STROJE

Určeno pro posluchače bakalářských studijních programů

1. Úvod
2. Konstrukční uspořádání
3. Princip činnosti stejnosměrného stroje
4. Rozdělení stejnosměrných strojů
5. Provozní vlastnosti stejnosměrných generátorů (dynam)
6. Provozní vlastnosti stejnosměrných motorů s cizím buzením
7. Stejnosměrný motor se sériovým buzením

Doc.Ing.Václav Vrána,CSc., Ing. Stanislav Kocman,Ph.D., Ing. Václav Kolář Ph.D.

poslední úprava: únor 2006

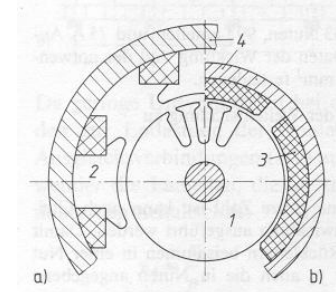
1. Úvod

Stejnosměrné stroje jsou historicky nejstaršími elektrickými stroji a nejprve se používaly jako generátory pro výrobu stejnosměrného proudu. V řadě technických aplikací byly tyto V současné době se stejnosměrné stroje používají především jako *motory* v elektrických regulovaných pohonech (např. u obráběcích strojů, válcovacích stolic, těžních strojů, v automobilovém průmyslu a v elektrické trakci). *Generátory* (dynam) jsou postupně nahrazovány polovodičovými usměrňovači. Regulované pohony se stejnosměrnými motory jsou v řadě technických oblastí postupně nahrazovány střídavými regulovanými pohony s asynchronními motory a to zejména proto, že stejnosměrné motory jsou vzhledem k asynchronním motorům složitější, výrobně a provozně nákladnější. Stále existují oblasti, ve kterých se stejnosměrné stroje používají pro své některé výhodné vlastnosti a speciální charakteristiky.

2. Konstrukční uspořádání

Na statoru jsou k vytvoření magnetického toku umístěny hlavní póly, které mohou být buzeny cívkami, nebo permanentními magnety. Póly s buzením vinutím se skládají z pólového jádra a pólového nástavce. Dále jsou zde mohou být tzv. *pomocné póly* (komutační) umístěné mezi hlavními póly pro zlepšení komutačních vlastností stroje.

Rotor (pohyblivá část stroje, nazývaná kotvou) je složená z dynamových (izolovaných křemíkových) plechů v jehož drážkách umístěných po obvodu je vinutí. Jednotlivé cívky vinutí kotvy jsou připojeny k měděným vzájemně izolovaným lamelám *komutátoru*, který zde zastává funkci mechanického usměrňovače proudu. Komutátor je mechanicky spolu s magnetickým obvodem nasazen na hřídeli stroje. Na komutátor dosedají *kartáče*, umístěné ve speciálních držácích, jimiž se přivádí proud do vinutí kotvy. Komutátor a kartáče tvoří sběrné ústrojí stroje.



Provedení statoru ss stroje (čtyřpólového)

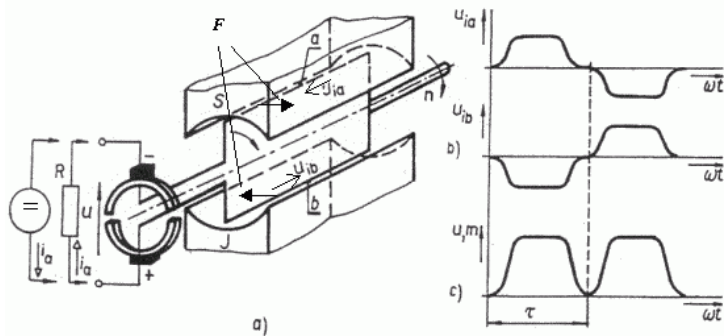
- a) s buzením
- b) s permanentními magnety

- 1- kotva
- 2- póly s cívkami
- 3- póly s permanentními magnety
- 4- kotva statoru

Obr.1 Řez motorem

3. Princip činnosti stejnosměrného stroje

Princip činnosti lze vysvětlit na elementárním stroji, jehož vinutí kotvy tvoří pouze dva vodiče a, b spojené do jednoho závitu umístěném na rotoru, který se otáčí v magnetickém poli vytvořeném dvojicí hlavních pólů (s jedním severním a jižním pólem s roztečí τ , viz. obr.2). Závít je připojen ke dvěma lamelám komutátoru, které jsou navzájem izolovány a otáčejí se společně s rotorem. Na komutátor dosedají dva nepohyblivé kartáče, které jsou umístěny do tzv. neutrální osy tj. do geometrické osy mezi dvěma sousedními hlavními póly. Stejnosměrné stroje mohou pracovat jako *generátory* (přeměňují mechanickou energii na elektrickou) a nebo jako *motory* (přeměňují naopak elektrickou energii na mechanickou). Schéma elementárního stroje je na obr.2a), ve kterém pro větší přehlednost není nakreslen rotor stroje.



Obr.2. Princip činnosti stejnosměrného stroje :

- a) schéma elementárního stroje, b) indukované napětí v jednotlivých vodičích, c) indukované napětí na svorkách stroje a moment stroje

Otáčeli-li se kotva v naznačeném směru (obr.2a) otáčkami n , pohybují se vodiče závitu o délce l v magnetickém poli s indukcí B rychlostí v (kolmou složkou na směr siločar) indukují se do nich dle indukčního zákona tzv. *pohybová napětí* :

$$u_{ind} = B \cdot l \cdot v$$

Směry indukovaných napětí v jednotlivých vodičích a, b, jsou vyznačeny na obr.2a). Za polovinu otáčky si vodiče vymění místa a indukovaná napětí v nich změni svůj směr a mají tedy tvar střídavého napětí. Vodiče jsou připojeny k lamelám komutátoru, na který dosedají kartáče. Ke spodnímu kartáči (+) je vždy připojen vodič pod jižním pólem a k hornímu kartáči (-) vodič pod severním pólem. Polarita napětí na kartáčích se tedy nemění, to znamená, že komutátor *usměrňuje střídavé napětí* indukované ve vinutí kotvy. Vnější obvodem připojeným ke kotvě protéká stejnosměrný proud, zatímco ve vodičích kotvy má proud střídavý charakter. Časové průběhy indukovaných napětí v jednotlivých vodičích a indukovaného napětí na svorkách nezátíženého stroje jsou na obr.2b, a 2c, a jsou dány šířkou pólů, tvarem pólových nástavců stroje a skutečnou indukcí magnetického pole ve vzduchové mezeře, která není po celém obvodu konstantní. Mezi póly je velmi slabá. Indukované napětí na svorkách stroje je pulzující, pro jeho zlepšení se vinutí kotvy vyrábí s větším počtem cívek a jemu odpovídajícímu počtu lamel komutátoru.

Na vodiče, kterými prochází proud I_a a které se nacházejí v magnetickém poli s indukcí B působí síla F , jejíž velikost je dána vztahem :

$$F = B \cdot I_a \cdot l$$

Síly působící na jednotlivé vodiče cívkou vytvářejí točivý moment, jehož směr bude závislý na směru proudu ve vodičích a v přívodu k motoru.

V případě připojení napětí zdroje, které je větší než napětí indukované bude mít moment stroje hnací účinek, jehož důsledkem bude snaha o urychlení rotoru a zvýšení otáček až na hodnoty rychlosti naprázdno Ω_0 (otáček n_0) a tím i indukovaného napětí na hodnotu napětí zdroje.

V případě připojení napětí menšího, nebo pouze rezistoru, bude mít moment stroje brzdný účinek jehož důsledkem bude snaha o snížení otáček a tím i indukovaného napětí.

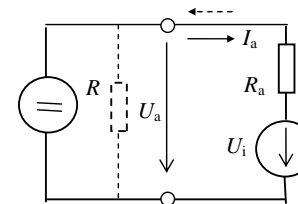
Časový průběh momentu stejně jako indukovaného napětí má opět pulzující tvar (obr.2c).

Indukované napětí a točivý moment

Zjednodušeně lze velikost indukovaného napětí ve vinutí kotvy vyjádřit vztahy

$$U_{ind} = c \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (V; Wb, rad \cdot s^{-1}) \quad U_{ind} = c \cdot \Phi \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (V; Wb, ot \cdot min^{-1})$$

kde c - konstrukční konstanta stroje
 Φ - magnetický tok
 Ω - úhlová rychlost otáčení kotvy,
 n - otáčky kotvy



Vnější připojení zdroje, nebo rezistoru bude kotevním obvodem protékán proud I_a , jehož velikost a smysl je možno určit z napěťové rovnice obvodu

$$I_a = \frac{U_a - U_{ind}}{R_a}$$

Pro případ připojení rezistoru R : $I_a = \frac{-U_{ind}}{R_a + R}$

bude stejně jako při $U_a < U_{ind}$ směr proudu obrácený (znázorněno čárkovaně na obr.)

Obr.3 Náhradní schéma obvodu kotvy

Tento proud vyvolá silové účinky na vodiče a tím i tzv. elektromagnetický moment stroje M_{em} , který je dán vztahem

$$M_{em} = \sum F \cdot \frac{D}{2} = c \cdot \Phi \cdot I_a$$

:kde c konstrukční konstanta stroje

Výstupní mechanický moment na hřídeli motoru M je menší o malou složku představující mechanické ztráty, která se často neuvažuje a lze ho proto vyjádřit vztahem

$$M \cong M_{em} \rightarrow M = c \cdot \Phi \cdot I_a \quad (N \cdot m; Wb, A)$$

Mezní (maximální) hodnoty momentu jsou dány s ohledem na komutaci maximální dovolenou hodnotou proudu, která u normálních provedení bývá obvykle v rozmezí 150 až 200 % jmenovité hodnoty, Její překročení může vést ke zničení komutátoru a tím i vyřazení stroje z provozu.

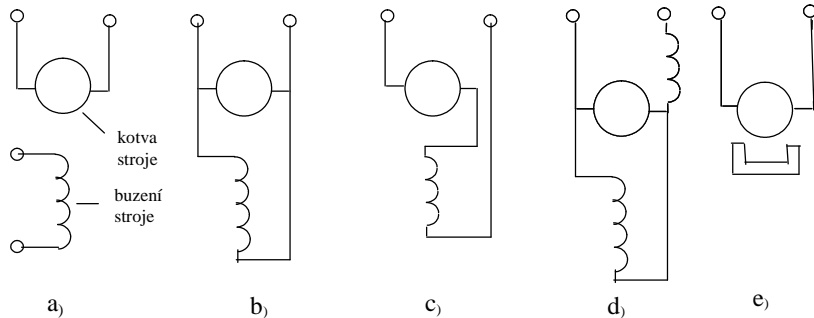
4. Rozdělení stejnosměrných strojů

Stejnoseměrné stroje s budícím vinutím na hlavních pólech rozdělujeme podle způsobu napájení tohoto vinutí

- stroje s cizím buzením (obr.4a) – budící vinutí hlavních pólů je napájeno z nezávislého stejnosměrného zdroje a nebo má stroj permanentní magnety (PM).
- stroje s derivačním buzením (obr.4b) – budící vinutí hlavních pólů je zapojeno paralelně ke kotvě
- stroje se sériovým buzením (obr.4c) – budící vinutí hlavních pólů je zapojeno do série s kotvou
- stroje s kompaundním (smíšeným) buzením (obr.4d) – na hlavních pólech je budící vinutí derivační a sériové.

Podle druhu buzení má každý stroj své charakteristické vlastnosti, které lze posoudit podle příslušných charakteristik stroje. U generátorů to jsou zejména jejich vnější charakteristiky (tj.

závislost svorkového napětí na zatěžovacím proudu při konstantním buzení a rychlosti), u motorů zejména jejich mechanické charakteristiky (tj. závislost úhlové rychlosti na momentu motoru při různých tzv. řídicích parametrech).

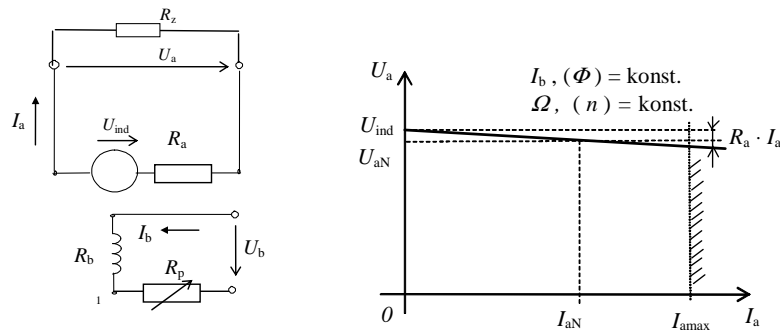


Obr.4. Druhy stejnosměrných strojů: a) s cizím buzením, b) s derivačním buzením, c) se sériovým buzením, d) s kompaundním buzením, e) s permanentně, i magnety

5. Provozní vlastnosti stejnosměrných generátorů (dynam)

Stejnoseměrný generátor s cizím buzením

Proud tekoucí budícím vinutím I_b a tím i tok Φ a velikost indukovaného napětí U_{ind} lze měnit buď rezistorem R_p , nebo řízeným napájecím zdrojem (např. usměrňovačem) $U_b = var$.



a) Náhradní schéma zapojení obvodů kotvy a buzení b) Vnější charakteristika

Obr.5 Generátor s cizím buzením

Svorkové napětí zatíženého generátoru lze v ustáleném stavu zjednodušeně vyjádřit vztahem

$$U_a = U_{ind} - R_a \cdot I_a = U_{ind} - \Delta U_a,$$

kde ΔU_a – celkový úbytek napětí na obvodu kotvy

Z vnější charakteristiky je vidět, že při zkratu na svorkách generátoru (tj. při $U_a = 0$) může dosáhnout proud kotvy značných hodnot. Polaritu svorkového napětí generátoru lze měnit

přepólováním polarity buzení (tj.změnou směru budícího proudu a tím i magnetického toku) nebo změnou směru otáčení rotoru.

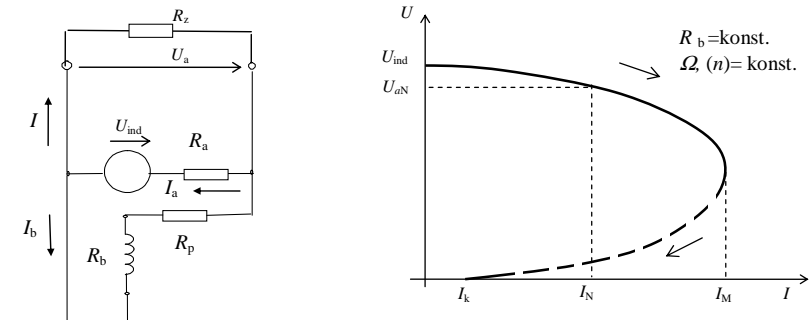
Výhody generátoru : - tvrdý zdroj napětí s širokým a plynulým rozsahem řízení napětí U_a

Nevýhody generátoru: - zvláštní zdroj buzení (neplatí v případě provedení s PM)

Použití generátoru: pro aplikace, kde je zapotřebí plynule a v širokém rozsahu řídit stejnosměrné napětí - např. v Leonardově měnič (W-L měnič)

Stejnoseměrný generátor s derivačním buzením

Budící vinutí je připojeno paralelně ke kotvě. Podmínkou činnosti generátoru je existence tzv. *remanentního, zbytkového magnetizmu* v magnetickém obvodu hlavních pólů provedených z *feromagnetického materiálu*. Charakteristickou vlastností těchto materiálů je vytváření zbytkového, tzv. remanentního magnetického pole, které v materiálu zůstává i po zrušení vnějšího magnetického pole.



a) Schéma zapojení b) Vnější charakteristika

Obr. 6 Stejnoseměrný generátor s derivačním buzením

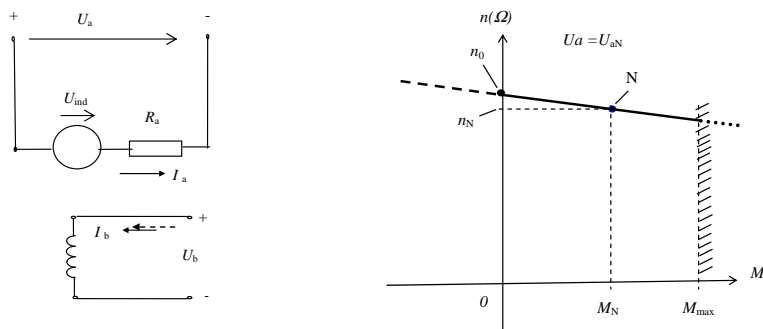
Při zvyšování zatěžovacího proudu I dochází ke snižování svorkového napětí U_a a tím se snižuje budící proud I_b (generátor se odbuzuje) a tím dále klesá jak indukované, tak i svorkové napětí generátoru. Při dosažení maximálního zatěžovacího proudu I_M dojde vlivem odbuzení k prudkému poklesu svorkového napětí společně se zatěžovacím proudem .

Výhody generátoru: - není třeba zvláštní zdroj buzení
- vydrží bez poškození zkrat na výstupních svorkách

Nevýhody generátoru: - užší rozsah řízeného napětí
- měkčí vnější charakteristika

6. Provozní vlastnosti stejnosměrných motorů s cizím buzením

Budící vinutí je stejně jako u generátoru napájeno z nezávislého stejnosměrného zdroje.



a) Schéma zapojení b) Mechanická charakteristika
Obr.7 Stejnsměrný motor s cizím buzením

Rychlost otáčení motoru

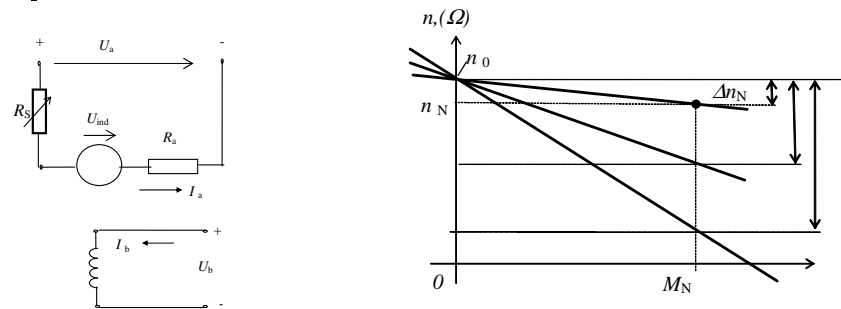
$$\Omega = \frac{U_a}{c \cdot \Phi} - \frac{R_a}{c^2 \cdot \Phi^2} \cdot M = \Omega_0 - k_M \cdot M \quad \text{nebo} \quad n = \Omega_0 \cdot \frac{30}{\pi} - k_M \cdot \frac{30}{\pi} \cdot M = n_0 - \Delta n(M)$$

Otáčky naprázdno n_0 jsou přímo úměrné napájecímu napětí kotvy U_a a nepřímo úměrné magnetickému toku Φ $n \approx \frac{U_a}{\Phi}$. Sklon (tvrdost) charakteristiky vyjádřený koeficientem k_M

je přímo úměrný velikosti celkového odporu kotevního obvodu R_a a nepřímo úměrný magnetickému toku. Rychlost (otáčky) motoru lze řídit těmito způsoby:

- Změnou celkového odporu v obvodu kotvy (zapojením přídavného rezistoru R_S)
- Změnou přiváděného svorkového napětí U_a na kotvu motoru
- Změnou magnetického toku Φ (změnou budícího proudu I_b)
- Kombinací řízení rychlostí napětím kotvy i budícím proudem (magnetickým tokem)

ad a) Řízení rychlosti motoru změnou odporu v obvodu kotvy ($U_a = \text{konst.}$, $\Phi = \text{konst.}$)



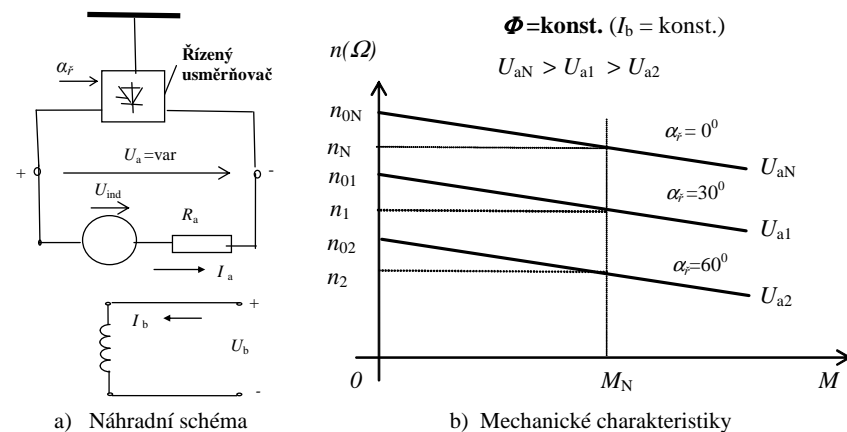
a) Náhradní schéma b) Mechanické charakteristiky
Obr.8 Řízení rychlosti změnou odporu R_S v obvodu kotvy.

K řízení rychlosti je použit rezistor R_S zapojený v obvodu kotvy motoru (viz. obr.8). Rychlost naprázdno Ω_0 (otáčky n_0) je konstantní a sklon charakteristiky se nastavuje velikostí odporu R_S . Na tomto odporu vznikají trvale ztráty. Pro svoji nehospodárnost lze toto řízení použít jen u motorů velmi malých výkonů, popř. pro rozběh motoru.

ad b) Řízení rychlosti motoru změnou napětí na kotvě (Φ_N a I_{bN}) = konst.)

Změna velikosti přiváděného napětí na svorky kotvy motoru se prakticky provádí nejčastěji použitím fázově řízeného tyristorového usměrňovače. Změnou řídicího úhlu α u tyristorů lze řídit střední hodnotu výstupního napětí usměrňovače tj. napětí na kotvě motoru, čímž se mění pouze rychlost naprázdno. Tvar (sklon) mechanických charakteristik zůstává zachován.

Výhodou je plynulá změna rychlosti otáčení motoru v širokém rozsahu od nuly až do jmenovité rychlosti. Toto řízení je v důsledku velmi malých ztrát v motoru hospodárné.

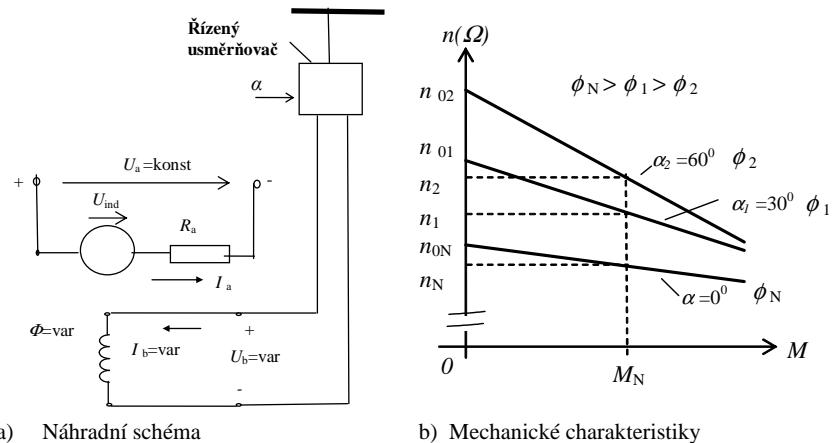


a) Náhradní schéma b) Mechanické charakteristiky
Obr.9 Řízení rychlosti změnou napětí na kotvě U_a

Pro možnost řízení rychlosti a toku výkonu v obou směrech (motor - brzda) se nejčastěji používá k napájení kotvy motoru antiparalelní spojení usměrňovačů. Maximální moment motoru M_{max} je dán nastaveným proudovým omezením v usměrňovači.

ad c) Řízení rychlosti motoru změnou magnetického toku (tj. změnou buzení při $U_{aN} = \text{konst.}$)

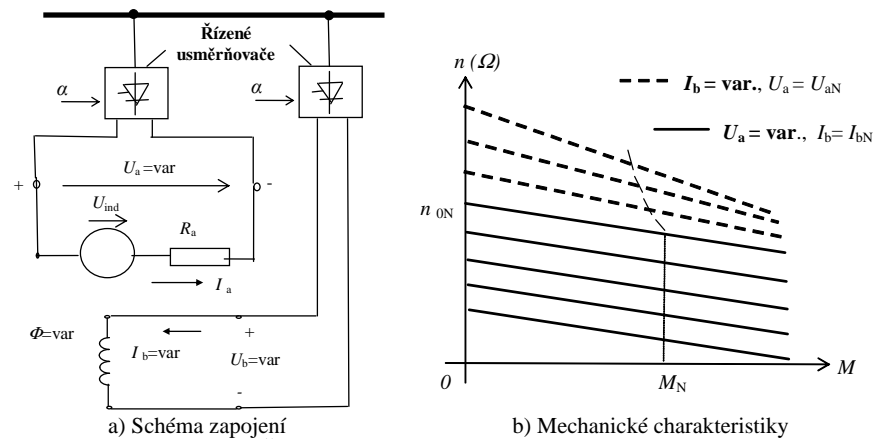
Používá se pro řízení rychlosti motoru nad rychlost jmenovitou, tj. pro $n > n_N$. K napájení budícího obvodu se nejčastěji používá polovodičového řízeného usměrňovače. Změnou střední hodnoty výstupního napětí usměrňovače se mění velikost budícího proudu a magnetického toku. Snižováním magnetického toku tj. odbuzováním motoru se zvyšují otáčky naprázdno n_0 a charakteristiky se zároveň změkčují (zvětší se Δn)



a) Náhradní schéma
b) Mechanické charakteristiky
Obr.10 Řízení rychlosti změnou budícího napětí (budícího proudu a magnetického toku)

ad d, kombinace řízení rychlostí napětím kotvy i budícím proudem (magnetickým tokem)

Používá se pro řízení rychlosti motoru ve dvou rozsazích. V rozsahu od nuly po jmenovitou rychlost jde o řízení napětím kotvy při konstantním buzení. Nad rychlost jmenovitou, jde o řízení odbuzováním, tj. zmenšováním budícího proudu (magnetického toku) při konstantním jmenovitém napětí. K realizaci se obvykle používá dvou řízených usměrňovačů.



a) Schéma zapojení
b) Mechanické charakteristiky
Obr. 11 Řízení napětím kotvy U_a a budícím proudem I_b

Spouštění stejnosměrného motoru s cizím buzením

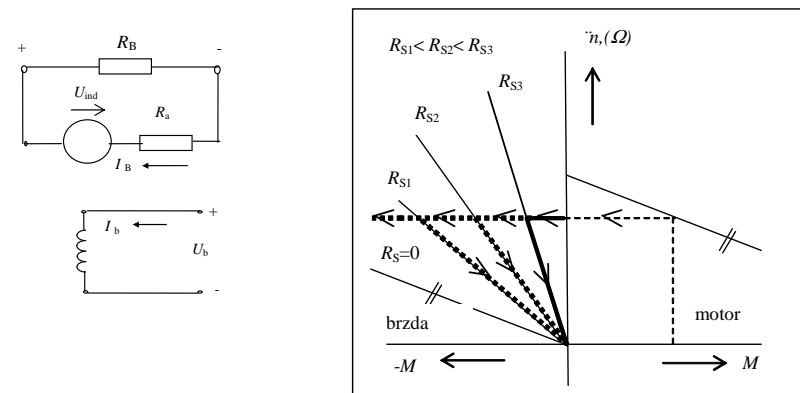
Z charakteristik motoru je zřejmé, že tento druh motoru nelze spouštět přímým připojením k napájecímu zdroji (až na výjimky malých motorků), protože moment záběru při rozběhu by byl větší než maximální dovolený moment. Při připojení motoru k napájecímu zdroji je nutno zajistit, aby proud motoru nepřekročil mezní dovolenou hodnotu, což se v praxi provádí:

- Řízením velikosti napájecího napětí,
- Připojením předřadného rezistoru do obvodu kotvy motoru.

Brzdění stejnosměrného motoru s cizím buzením

a) Brzdění do odporu

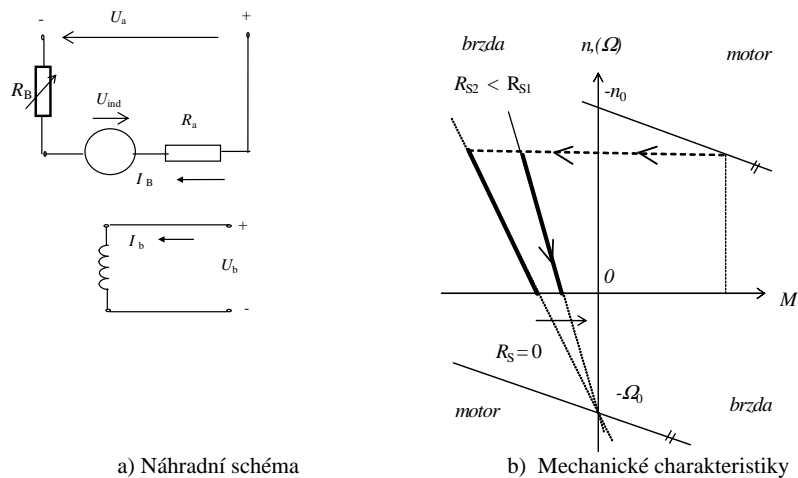
Vinutí kotvy točícího se motoru se odpojí od napájecího zdroje a připojí se k vhodnému rezistoru, tím se změni směr proudu v kotvě a smysl momentu motoru (viz. obr.12b). Motor je poháněn pracovním mechanismem a stává se tak generátorem, měnícím mechanickou energii na elektrickou, která se mění v odporech kotevného obvodu na Jouleovo teplo.



a) Náhradní schéma
b) Mechanické charakteristiky
Obr.12 Brzdění do odporu.

b) Brzdění protiproudem

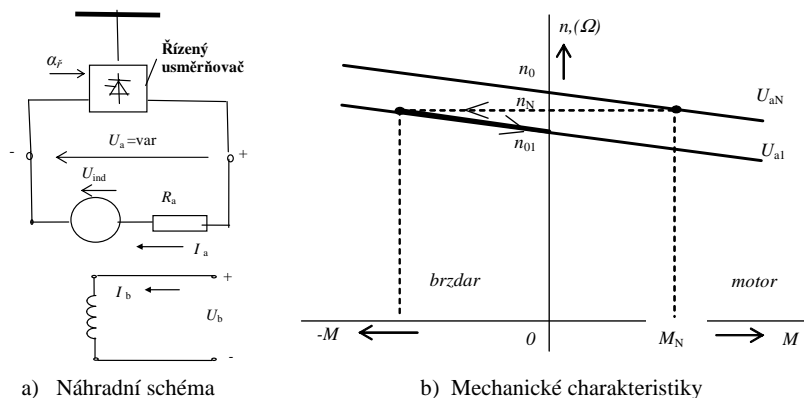
Otáčející se kotva motoru se odpojí od napájecího zdroje a zapojení se k němu s opačnou polaritou, dojde k tzv. - *přepólování* (*reverzaci*) napětí na svorkách kotvy a tím ke změně směru proudu v kotvě motoru a ke změně smyslu momentu. Po dosažení klidu (nulových otáček) se motor bude snažit rozběhnout na opačnou rychlost naprázdno a proto je nutno odpojit kotvu motoru od napájecí sítě. Pro omezení velikosti proudu při brzdění se do obvodu kotvy zařazuje rezistor s velkým odporem R_S . Ztráty při tomto způsobu brzdění jsou velmi vysoké (součet dodaného mechanického výkonu na hřídeli a elektrického výkonu odebraného z napájecí sítě)



a) Náhradní schéma b) Mechanické charakteristiky
Obr. 13 Brzdění protiproudem.

c) Brzdění rekuperační (generátorické)

- Nastává tehdy jsou-li otáčky motoru větší než je hodnota otáček naprázdno, tj. při $n > n_0$. Toho lze dosáhnout např. snížením napětí na kotvě motoru (při napájení z řízeného zdroje), čímž dojde ke snížení otáček naprázdno ($n_0 \approx U_a / c \cdot \Phi$), nebo zvýšením mechanických otáček. Motor se tak stává generátorem a dodává elektrickou energii do napájecího zdroje. V okamžiku snížení napětí jsou vlivem setrvačnosti rotujících hmot otáčky motoru stejné, tj. při dostatečně velkém snížení napětí pak platí, že $n > n_{01}$ a proud I_a s momentem M motoru tak musí změnit svůj smysl.



Obr. 14 Brzdění generátorické

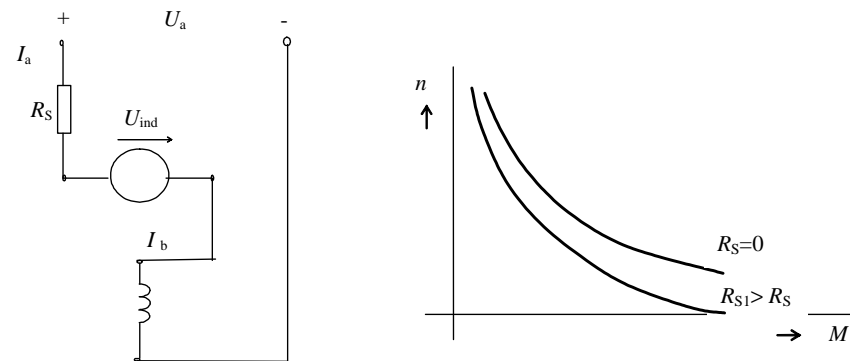
- Nutnou podmínkou tohoto způsobu je možný oboustranný tok výkonu (proudu) v napájecím zdroji.
- Toto brzdění je hospodárné, ztráty jsou rovny rozdílu mechanického a elektrického výkonu.

Použití stejnosměrných motorů s cizím buzením:

- v automobilovém průmyslu pro pohony různých mechanismů, pro pohony obráběcích strojů, elektromobilů, válcovacích stolic, těžních strojů, apod.

7. Stejnosměrný motor se sériovým buzením

Motor má budící vinutí zapojeno do série s obvodem kotvy. Proud kotvy je totožný s budícím proudem a magnetický tok je tak funkcí proudu kotvy, tj. buzení motoru je závislé na velikosti zatížení motoru : $I_a = I_b \rightarrow \Phi = f(I_a)$



a) Náhradní schéma zapojení b) Mechanické charakteristiky
Obr. 15. Stejnosměrný motoru se sériovým buzením

$$\Omega = \frac{U_a}{c \cdot \Phi(I)} - \frac{R_a}{c \cdot \Phi(I)} \cdot I \quad \text{nebo} \quad n = \Omega \frac{30}{\pi}$$

Mechanická charakteristika je tzv. měkká, otáčky naprázdno jsou teoreticky nekonečné, tzn. že motor nesmí nikdy pracovat bez zatížení. Jejich výhodou je velký moment při nízké rychlosti.

Řízení rychlosti je možné těmito způsoby :

- změnou odporu v obvodu kotvy R_S
- změnou napětí na kotvě pomocí řízeného usměrňovače nebo pulzního měniče
- změnou buzení pomocí paralelně připojeného rezistoru k budícímu vinutí
- u vícemotorových pohonů např. u lokomotiv řazením jednotlivých motorů do paralelních nebo sériových skupin (skoková změna napětí na kotvách motorů)

Brzdění je možné těmito způsoby :

- brzdění do odporu: buď přímo s přepólovaným budícím vinutím a nebo přepojením sériového motoru na motor s cizím buzením
- brzdění protiproudem
- brzdění rekuperační (je možné pouze při napájení motoru z pulzního měniče)

Použití motoru se sériovým buzením

V elektrické trakci jako trakční motory (např. pro lokomotivy), nebo jako tzv. univerzální motory, které se mohou napájet jak střídavým tak i stejnosměrným napětím používané pro elektrické nářadí (např. vrtačky, brusky, malé kuchyňské spotřebiče).